

# 陽子・中性子とDブレイン

## 1. はじめに

ある日のこと、近頃の弦理論の研究が重要であることを一般の人々にも分かりやすく説明するにはどうするのが良いか、ということが話題になりました。誰かが弦理論の研究で非常に重要な役割を果たしてきた「Dブレイン」を例にとって、「例えば、Dブレインの研究がどうして重要なのかをどうやって説明したら良いだろう?」という質問を投げかけました。私の答えは「そんなのは簡単だ。我々はDブレインでできているのだから。」あまりにも突飛と思われるかも知れませんが、かなりまじめです。ただ、ちょっと言い過ぎました。より正確には、「我々の体を構成している原子の中に含まれる陽子や中性子のような粒子が弦理論の中のDブレインとして理解できる。」と言うべきでした。Dブレインとは何か? どうしてそんなことが言えるのか? 今回はこのことに関する話題をお話しましょう。

## 2. クォークとQCD

中学か高校の理科の時間に、原子は原子核という陽子や中性子がいくつか堅く結びついてできた小さな塊とその周りをぐるぐる回っている電子からなるということを知ったと思います。さらに大学に入って物理を専攻すると、陽子や中性子は、「クォーク」というもっと小さな粒子が3つ集まってできた複合粒子であるこ

とを習います。<sup>1</sup>

これだけではありません。原子核の中にはパイオンと呼ばれる粒子が飛び交っています。これは陽子や中性子を堅く結びつける力を説明するために湯川秀樹博士が理論的に存在を予言し、後に実験で確認された粒子です。このパイオンも複合粒子で、クォークと反クォークがくっついてできたものであると考えられています。ここで、反クォークというのはクォークの相棒で、電荷の符号が逆であることを除くとクォークとほとんど同じ性質を持つ粒子です。

このようにクォークや反クォークがいくつか集まってできた粒子のことを「ハドロン」と呼びます。実はハドロンにはたくさんの種類があって、実験で存在がはっきりと確認されているものに限ってもなんと数百種類以上もあります。そして、いくつかの例外を除いてそのほとんどが、クォーク3つか、あるいはクォークと反クォークがくっついてできています。陽子や中性子のようにクォークが3つ集まってできた粒子を「バリオン」と呼び、パイオンのようにクォークと反クォークがくっついてできたものを「メソン」と呼びます(図1)。

クォークはこのように3人組(バリオン)かカップル(メソン)になりたがる性質があり、単体で取り出すことに成功した実験は未だにありません。その理由

<sup>1</sup> 現在のところ6種類のクォークが実験で確認されており、アップ、ダウン、ストレンジ、チャーム、ボトム、トップという名前がついています。この記事では、軽いクォークに注目するので、クォークと言ったらアップクォークとダウンクォークを指すと考えてください。

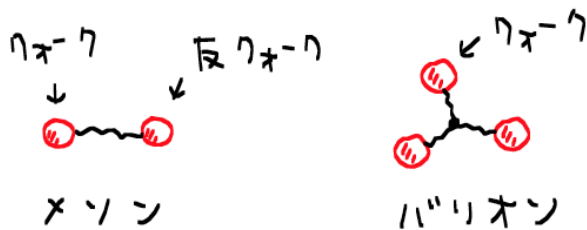


図1 クォークモデルにおけるメソンとバリオン

は、「グルーオン」と呼ばれるまた別の粒子があって、その粒子の作用でクォークや反クォークの間に「強い力」と呼ばれる非常に強い力が働くからです。このクォークとグルーオンが登場する強い力の理論は「QCD」<sup>2</sup>と呼ばれています。

QCDは驚くほどシンプルで大変美しい理論です。見ていてうっとりします。しかし、その反面、解析が非常に難しい理論であることも知られています。この理論を使ってハドロンの質量、大きさ、相互作用の強さなどの諸々の性質を理論的に計算するのは大変なことで、手計算ではとても歯が立ちません。そのため、スーパーコンピュータを駆使してガリガリ計算する手法などが開発されてきました。その結果、QCDは実験事実をととても良く再現することが示され、ハドロンの性質を正しく記述する理論としての揺ぎない地位を確立しました。このように、クォークやグルーオンを単体で取り出して見せた実験もなく、解析も非常に困難な理論であるにも関わらず、人類がQCDに達することができたのはすごいことだと感心させられます。

### 3. 粒子かひもか

前節で、陽子や中性子はクォークが3つ集まってできた粒子だと言いました。では、クォークはもっと小さな粒子が集まってできたものだったりするのでしょうか？

<sup>2</sup> 正式名称は「量子色力学」で、その英語名Quantum Chromodynamicsから頭文字を取ってQCDと呼ばれるようになりました。

これは面白い考え方ですが、今のところそれを支持する実験事実はありません。このように、それ以上内部構造がない点粒子と考えられる粒子のことを「素粒子」と言います。上で出てきたクォークやグルーオンの他に、電子や光の粒である光子なども素粒子の仲間です。

このように素粒子にはいろいろな種類のものがあるのですが、どうしてそのようにいろいろな種類の素粒子が存在するのかはまだ良く分かっていない謎です。あらゆる物質が原子からなるとした原子論、100種類以上ある原子が電子と陽子と中性子からなるとした原子模型の理論、数百種類もあるハドロンがいくつかのクォークを考えることで説明できるとしたクォークモデルなど、複雑なものがよりシンプルなものでも構成できることが分かった時に、物理学は大きく進歩します。素粒子の研究者は、いろいろな素粒子をよりシンプルな原理から導くことはできないものかといつも思いを巡らせているのです。

その謎を解決する可能性があるとき期待されている理論の一つが「弦理論」です。弦理論は現在のところ点粒子と考えられている素粒子を大きく拡大して見てみると、実はひも状をしているという仮説に基づく理論です(図2)。

弦理論の構成要素はたった1種類のひもなのですが、このひもは振動したり、回転したりすることができ、その状態が異なれば、異なる性質の粒子のように振る舞います。それによって種類の異なる素粒子を同じひもから導くことができる可能性があるのです。それだけではありません。実際に許されるひもの状態を解析してみると、驚くべきことに「重力子」と呼ばれる重力を伝える働きをする素粒子に対応する状態が存在することが示されました。実は重力子は他の素粒子と性質がずいぶん異なり、これを含んだ矛盾のない理論を作ることは長年の物理学者の夢でもありました。弦理論は図らずもその夢を叶えてくれる理論になっていたのです。

弦理論の最も驚くべき予言の一つは時空の次元が10次元(時間1次元と空間9次元)であるというこ

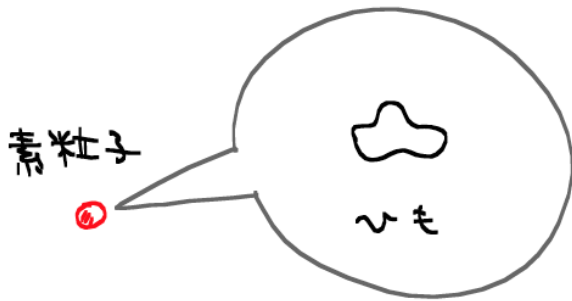


図2 素粒子とひも

とです。普段私たちが実感できる時空の次元は4次元（時間1次元と空間3次元）ですが、さらに6次元の隠れた空間の方向があるということです。<sup>3</sup>

この隠れた6次元のことを余剰次元と呼びます。余剰次元の方向がどのような形をしているかによって、4次元の世界に実現される素粒子の種類が異なります。この世に存在する多様な素粒子の構造は余剰次元が存在するお陰で実現可能になるとも言えます。その余剰次元の形を決定する方法はまだ良く分かっておらず、そこが弦理論の悩みの一つなのですが、ある場合には、実験で見ついている素粒子に近いものを導くことができることが示されています。弦理論は理論の制約がとて強いので、好き勝手に必要な素粒子を見繕って理論に組み込むということができません。そんな理論が、自然に重力子を含み、さらに実験で見ついている他の素粒子も再現するというのは偶然とはなかなか考えられない奇跡的なことだと思います。そのため、弦理論は多くの研究者を魅了し、「究極の統一理論」や「万物の理論」の候補とまで言われました。このようなことが分かってきたのは80年代中頃のことです、この時期に驚くべき発見が相次いだことから弦理論の第一次革命と呼ばれています。

このような究極の統一理論としての弦理論の可能

<sup>3</sup> 時空の次元というのは、正確に待ち合わせをするときに指定することが必要な数字の数のことです。例えば、北に100メートル、東に50メートル進んだところの高さ30メートルの地点で10分後に待ち合わせよう、という（100, 50, 30, 10）という4つの数字を指定する必要があるのです、時空の次元は4次元である、という言い方をします。弦理論ではこの4つでは足りずに、10個の数字を指定する必要があるというわけです。

性は今でもその魅力を失っておらず、多くの研究者が研究を続けているのですが、残念ながらまだ完成には至っていません。後でがっかりさせると困るので、今のうちに断っておきますが、これからの話は究極の理論についての話ではありません。2節で述べたようなQCDやハドロンに関わる部分に特化して、その部分の物理を弦理論によって記述する試みについてお話ししたいと思います。弦理論を使ってハドロンを記述し、曲がりなりにも実験と比較し得るさまざまな物理量を計算することができるのです。そのようなことが可能になるためには、弦理論がもう一度進化を遂げる必要がありました。

#### 4. ゲージ・ストリング双対性

90年代後半になって弦理論の第二次革命と呼ばれる大発展の時期が再び訪れました。その発展は主として弦理論の非摂動的効果のような理論的なもので、究極の理論のような華々しい印象はないかも知れません。しかし、その中で見いだされた発見の中には「時空の次元」や「素粒子」といった、それまで当たり前のように思われていたいくつかの基本的な概念に対する見方を根底から覆すようなものがいくつもあり、研究者たちは大いに興奮しているのです。その中でも、特に人々を驚かせたのが「ゲージ・ストリング双対性」の発見でした。

このゲージ・ストリング双対性は、一言で言うと、「ゲージ理論と弦理論がある場合に等価になる」ということを主張しています。まだゲージ理論が何かを説明していませんでしたが、QCDにおけるグルーオンのように、素粒子の間に働く力を媒介する素粒子をある種の対称性を課すことで導入する理論のことです。素粒子の間に働く基本的な力として知られる強い力、弱い力、電磁気力はどれもゲージ理論で記述されることが知られています。特に、2節で出てきたQCDはゲージ理論の代表例です。

このゲージ・ストリング双対性の驚くべき点は以下のようなところなのです。ゲージ理論は4次元時空に定義

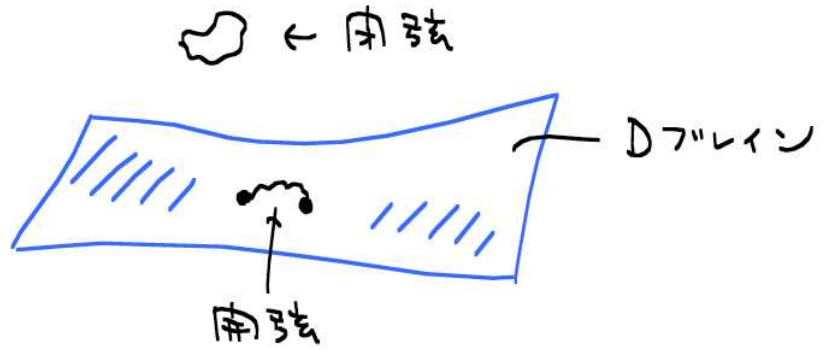


図3 Dブレーン、開弦、閉弦

された素粒子の理論であるのに対して、弦理論は10次元の(曲がった)時空に定義されたひもの理論です。理論の基本的な構成要素も異なるし、時空の次元すら異なります。このように見かけ上、全く異なるように見える理論が、ある場合には物理の理論として完全に等価になり得るといいます。こんなことがあるとは、1997年にマルダセナが予想するまで誰も思いもよらなかったことで、世界中の研究者がびっくりしました。

では、なぜゲージ理論と弦理論が等価になりうるのでしょうか。それを説明するには「Dブレーン」を導入する必要があります。Dブレーンというのは弦理論の中に存在することが知られている広がりを持った物体です。その広がり方にはいろいろなものがあります。時間方向と $p$ 次元の空間方向に広がっているDブレーンのことを $Dp$ ブレーンと呼びます。例えばD2ブレーンは10次元の時空の中に漂う膜上の物体です。シャボン玉のように丸いものや、無限に広がった平面状のものなど、いろいろな形のことを考えることができます。このDブレーンの特徴は、ひもの端点に乗ることができるということです。弦理論に出てくるひもには、輪ゴムのように輪っかになった「閉弦」と輪ゴムをはさみで切ったような形をした「開弦」の2種類があります。図3のように閉弦はDブレーンから離れることができますのですが、開弦は端点がDブレーンの上に乗っていないといけないので離れることができません。

一見、とても奇妙な印象を受けるかもしれませんが、弦理論にはこのような物体が存在するのです。そして、

90年代の後半になって、その重要性が認識され、弦理論の第二次革命において決定的な役割を果たしました。Dブレーンが重要だった一つの理由は、弦理論の枠内にゲージ理論を実現する方法を与えることにあります。Dブレーンにくっついた開弦が表すいろいろな素粒子の中にグルーオンのような力を伝える働きをする素粒子が存在し、Dブレーンの上にゲージ理論が実現されることを示すことができます。この段階ではまだひもの理論ですが、弦理論に含まれるパラメータを調整して、ひもの長さがゼロになる極限を取ると、大きさがゼロの点粒子からなる素粒子の理論になります。例えば、3次元空間に無限に広がったD3ブレーンを考えると4次元時空の上に定義されたゲージ理論を得ることができます。

一方、Dブレーンがあると、アインシュタインの一般相対性理論の教えに従って、周りの時空が曲がります。時空が曲がるというのは、少し分かりにくいかも知れませんが、次のような感じです。柔らかいゴム板に縦軸を時間方向、横軸を空間方向として方眼紙のようにマス目を描いた後にこのゴム板をぐにゃぐにゃに曲げた状態を想像してください。もとのマス目で直線で表される粒子の軌跡はゴム板を曲げると曲がった軌跡を描くようになります。重力の作用で粒子の軌跡が曲がる現象をこのように時空の曲がりで説明するのがアインシュタインの一般相対性理論の考え方です。さらに、ある状況では、Dブレーンをそれに対応する曲がった時空で置き換えてしまった方が良い近似になる場合があります。このとき、上で考えた極限を取って

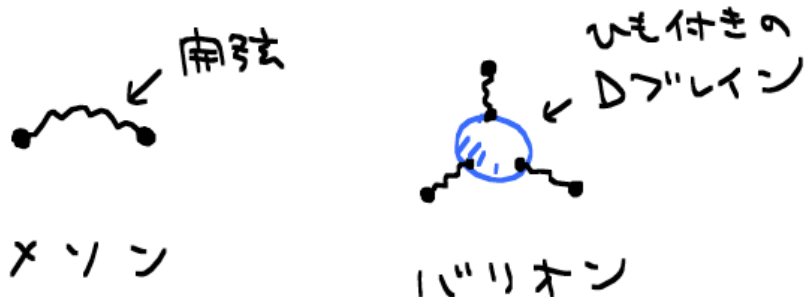


図4 弦理論におけるメソンとバリオン

もひもの長さがはゼロにはならず、ある曲がった時空における弦理論が得られます。

このようにして、Dブレーンから出発してゲージ理論と曲がった時空における弦理論という2つの記述が得られました。どちらも同じDブレーンから出発して得られるので、物理的な内容は同じであるはずだというのがゲージ・ストリング双対性の基本的なアイデアです。ただ、このように、ゲージ・ストリング双対性が成り立つ根拠となる議論は一応あるものの、精密に証明がなされた訳ではありません。本当にこの双対性が成り立っているのかどうかは個々の例に当たって調べて行く必要があります。その後の研究により、この双対性が成立することを示す膨大な数の非自明な証拠が挙がり、この双対性の正しさが広く信じられるようになりました。

## 5. ホログラフィックQCD

前節で説明したゲージ・ストリング双対性をゲージ理論の代表格であるQCDに応用したら何が言えるでしょうか？ QCDと等価になるような曲がった時空における弦理論のことをホログラフィックQCDと呼びます。<sup>4</sup>

今のところ、まだ完全にQCDと等価になる弦理論の記述は見つかっていませんが、エネルギーが低い現象に関してはQCDと良い近似で一致するような弦理

論の記述は得られているので、それに基づいて議論を進めることにします。2節で登場した陽子、中性子、パイオンといったハドロンはこのホログラフィックQCDにちゃんと含まれていることが示されます。ここでは結果だけですが、かいつまんで要点を説明してみましょう。

このホログラフィックQCDは前節で説明したような要領で、まずQCDを実現するようなDブレーンの配置の仕方を見つけ、その中の一部のDブレーンをそれに対応する曲がった時空に置き換えて構成されます。その結果、得られる弦理論の記述はある曲がった10次元時空にD8ブレーンが埋め込まれたような状況になっています。こんな設定で、どのようにしてハドロンが表されるのでしょうか？

まず、上記のようにD8ブレーンが存在するので、そこに端を持つ開弦が存在します。この開弦がメソンと解釈されるのです。図4と図1を見比べると、開弦とメソンは絵的にも良く似ていることが分かると思います。

3節で一つのひもからいろいろな素粒子を導けることを説明しましたが、これと全く同じ考え方を今の場合に適用すると、このD8ブレーンに乗った開弦から様々な種類のメソンを表すことができると期待されます。実際、このようにして弦理論から予言されるメソンを調べるとパイオンだけではなく、実験で確認されている数多くのメソンが再現されることが示されます。さらに、そうしたメソンの質量や相互作用の強さなどを計算してみると、荒い近似計算であるにも関わらず、かなり良く実験値を再現することが見て取れます。

<sup>4</sup> 4次元のQCDと10次元の弦理論が等価になることから、立体の情報を平面に記録する技術であるホログラフィーをもじってこう呼ばれています。

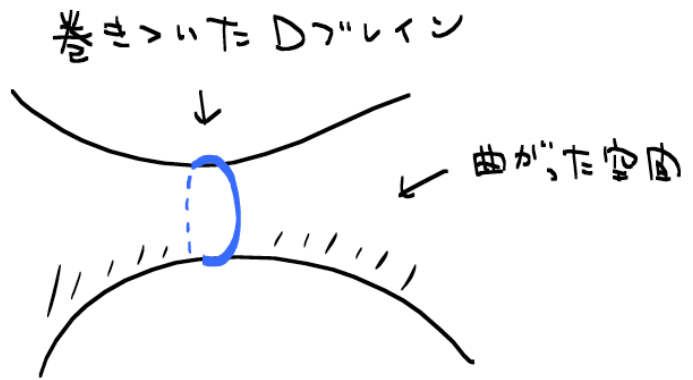


図5 巻き付いたDブレイン

3節では、クォークなどの素粒子を大きく拡大してみるとひも状をしているという仮説に基づく理論が弦理論であると言いましたが、ここではそうになっていないことに注意して下さい。クォークと反クォークからなる複合粒子と考えられているメソンがひもと同定されます。また、素粒子の理論が弦理論に取って代わられるのではなく、両者が同じ物理を表しているのです。これがゲージ・ストリング双対性のもたらした新しい見方です。

では、バリオンはどうでしょうか。冒頭で述べたように、バリオンはDブレインと同定されます。今、考えている曲がった時空には、図5のように余剰次元のうちの4つの方向に引っかかるような形で巻き付いたD4ブレインを考えることができます。

このD4ブレインは時間1次元と空間4次元に広がった物体ですが、この空間4次元の方向が全て余剰次元の方向に巻き付いているため、我々の感知できる4次元時空の中で見ると時間方向にしか広がりを持たない粒子として振る舞います。この粒子がバリオンと解釈されるのです。しかも、面白いことに、今の曲がった時空に含まれるRR場と呼ばれる場の影響で、このD4ブレインには開弦が必ず3本くっついていなければならないという条件が導かれます。図1と図4を見比べると、クォークが3つくっついてできたバリオンとひもが3本くっついたD4ブレインは絵的にも良く似ていることに気づくでしょう。

このようにして得られたバリオンからどのような性質の粒子が出てくるのかを調べると、陽子、中性子

と同定できる粒子がちゃんと含まれていることが分かります。それだけではなく、核子の励起状態など、実験で確認されているいろいろなバリオンが再現されます。また、より詳しい解析によって、陽子、中性子の持つ磁力の強さや電荷の分布などの性質の観測データをうまく再現することも示されます。

## 6. おわりに

こうして、原子核の中にひそむハドロンの世界を弦理論で記述することができ、メソンやバリオンがひもやDブレインとして表されることが分かりました。このような見方をすると、世界が少し違って見えてきます。特に陽子や中性子は私たちの体重の99.9%以上を占めている部分ですので、「我々はDブレインでできている」と言ってみたくもなるわけです。体重計に乗って量られるのはほとんどDブレインの重さだと思うと、体重計に乗るのも少し楽しくなってきませんか？

今回お話ししたことは、Dブレインの魅力のほんの一端にすぎません。Dブレインはあるときにはブラックホールを表したり、あるときには宇宙そのものを表したり、いろいろな場面に登場します。それについては、またの機会に。